

# QBe2 铍青铜合金固溶工艺与组织性能研究

岳丽娟<sup>1,2</sup>, 王艳婷<sup>1</sup>, 赵红运<sup>1</sup>, 饶晓方<sup>2</sup>, 王 泓<sup>3</sup>

(1. 宁夏中色新材料有限公司, 宁夏 石嘴山 753000)

(2. 西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司 稀有金属特种材料国家重点实验室, 宁夏 石嘴山 753000)

(3. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 为了研究固溶保温时间对 QBe2 铍青铜合金组织性能的影响规律, 对 QBe2 铍青铜合金进行 790 °C 固溶处理, 保温时间为 30~120 min, 并在流动清水中快速冷却以使富铍相充分固溶于基体中, 获得可以产生沉淀强化的过饱和固溶体, 分析了不同固溶保温时间对合金力学性能、电性能及微观组织的影响。结果表明, 当固溶保温时间为 60 min 时, 第二相能完全溶解到基体中; 当固溶保温时间为 90 min 时, 合金的力学性能完全满足固溶态产品的要求; 当固溶保温时间达到 120 min 时, 合金的塑性最好。经不同保温时间固溶后的材料, 其屈服强度与平均晶粒尺寸符合 Hall-Petch 关系。

**关键词:** 铍青铜; 固溶; 微结构; 塑性; 电性能

**中图分类号:** TB31; TG15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)03-0237-04

**引用格式:** 岳丽娟, 王艳婷, 赵红运, 等. QBe2 铍青铜合金固溶工艺与组织性能研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(3): 237-240.

YUE L J, WANG Y T, ZHAO H Y, *et al.* Study on Solid Solution Technology and Microstructure of QBe2 Beryllium Bronze Alloy[J]. Materials China, 2022, 41(3): 237-240.

## Study on Solid Solution Technology and Microstructure of QBe2 Beryllium Bronze Alloy

YUE Lijuan<sup>1,2</sup>, WANG Yanting<sup>1</sup>, ZHAO Hongyun<sup>1</sup>, RAO Xiaofang<sup>2</sup>, WANG Hong<sup>3</sup>

(1. CNMC Ningxia New Materials Co., Ltd., Shizuishan 753000, China)

(2. State Key Laboratory of Special Rare Metal Materials, Northwest Rare Metal Materials Research Institute Ningxia Co., Ltd., Shizuishan 753000, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to study the effect of solution holding time on the microstructure and properties of QBe2 beryllium bronze alloy, QBe2 beryllium bronze alloy was conducted by solution treatment under 790 °C for 30, 60, 90 and 120 min, then quenched with the flowing clean water in order to make the beryllium as rich phase fully dissolve in the matrix to obtain the supersaturated solid solution which can produce precipitation strengthening. The effects of different solution holding time on mechanical properties, electrical properties and microstructure of the alloy were also analyzed. The results show that the second phase can be completely dissolved into the matrix when the solution holding time is 60 min. When the solution holding time is 90 min, the mechanical properties of the alloy fully meet the requirements of the industrial products. When the solution holding time reaches 120 min, the plasticity of the alloy is the best. Besides, it also can be found that the yield strength and average grain size of the material after the different solution holding time are in accordance with the Hall-Petch relation.

**Key words:** beryllium bronze; solution treatment; microstructure; plasticity; electrical property

收稿日期: 2020-05-09 修回日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0303304)

第一作者: 岳丽娟, 女, 1976 年生, 高级工程师

通讯作者: 王 泓, 男, 1973 年生, 教授, 硕士生导师,

Email: wanghong@nwpu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202005006

## 1 前 言

铍青铜是一种典型的沉淀强化型合金, 经固溶和时效热处理后, 具有与特殊钢相当的高强度, 是唯一同时具备良好力学性能、物理性能及耐蚀性能的铜合金<sup>[1]</sup>。宁夏中色新材料有限公司是国内最大的铍青铜合金生产

研究基地, 2013 年公司的“高精度、大卷重铍青铜板带材关键技术研发”科技成果通过了中国有色金属工业协会鉴定, 整体技术达到国际先进水平, 实现了多种规格状态铍青铜带材的批量生产。

经过不断的发展和技术创新, 产品综合品质得到了较大提升, 目前年产可达 1000 t, 产品主要应用于电子电器、通讯仪表、航空航天、石油化工、冶金矿山、汽车家电、机械制造以及国防军工等多个领域。然而, 在现有热处理及加工工艺条件下, 该合金的组织及性能不够稳定, 尤其是合金的硬度指标不达标, 主要原因之一就是固溶工艺控制不佳, 对相关机理缺乏认识。固溶处理就是将铍青铜加热到单相组织状态, 使富铍相( $\beta$ 相)充分固溶于基体中, 并快速水淬以防止第二相析出, 从而获得均匀的过饱和固溶体<sup>[1]</sup>。固溶处理的加热温度和保温时间的合理选择与控制, 是确保铍青铜力学性能优良的关键环节。确定固溶处理规范的原则是既能获得足够过饱和度的  $\alpha$  固溶体, 又能得到细晶粒的组织, 因此, 有效控制固溶处理后铍青铜的晶粒度是保证热处理质量的关键环节。固溶温度过低或者保温时间不足, 会使富铍相不能充分溶入固溶体基体中, 弱化合金的沉淀强化能力; 若固溶温度过高或者保温时间过长, 则会引起晶粒粗化, 产生过热、过烧现象, 破坏合金的力学性能<sup>[2-5]</sup>。

本文研究了不同固溶保温时间对合金组织及性能的影响, 分析了固溶过程中铍青铜合金的组织及性能变化规律, 利用 Hall-Petch 关系探讨了 QBe2 铍青铜合金在不同固溶时间条件下屈服强度与晶粒尺寸的关系, 以期达到优化固溶时间的目的。

## 2 实 验

实验材料为铍青铜合金, 牌号为 QBe2。采用 25 kW 箱式电阻炉对 QBe2 铍青铜合金进行固溶处理实验, 首先将箱式电阻炉加热至 790 °C 并保持 60 min, 然后将 QBe2 铍青铜合金试样放入箱式电阻炉中, 到温后开始计时, 固溶保温时间分别设置为 30, 60, 90 和 120 min。

保温结束后, 将试样取出并控制在 10 s 内将其快速水冷至室温。使用 AG-IC50 kN 万能材料拉伸试验机、HVS-5 型自动转塔数显显微硬度计、DK60 涡流导电率仪、Olympus Gx51 金相显微镜, 分别测试不同固溶保温时间处理后试样的抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度、导电率以及平均晶粒尺寸等数据, 并进行对比分析, 确认合金的组织性能变化规律和机理, 寻找满足材料要求的固溶保温时间。

力学性能测试按照《GB/T228.1 室温拉伸实验方法》

和《GB/T4340—2009 金属材料维氏硬度试验》进行制样和检测, 每组实验测试 3 组数据并取平均值作为实验结果。

金相样品先经粗磨、细磨、清洗、抛光、烘干, 然后将试样浸入  $\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$  + 乙醇的浸蚀剂中, 浸蚀 10 s 后立即用水冲洗并吹干, 在金相显微镜下观察样品组织; 并将做完金相的样品用酒精清洗、烘干后, 在扫描电子显微镜(SUPRA 55)下进行组织形貌观察。

## 3 结果与分析

### 3.1 固溶保温时间对合金力学性能的影响

表 1 为固溶处理前后 QBe2 铍青铜合金的力学性能, 由表 1 可以观察到, 当固溶保温时间为 0 ~ 90 min 时, QBe2 铍青铜合金的抗拉强度、屈服强度和硬度随固溶保温时间的增加而明显降低; 而断后伸长率随固溶保温时间的增加而明显增大。当固溶保温时间为 60 min 时, 合金的抗拉强度、屈服强度已接近固溶态产品的性能要求, 硬度和伸长率已达到固溶态产品的性能要求。继续延长保温时间至 90 min, 合金的抗拉强度、屈服强度和硬度的降低幅度和伸长率增大幅度均有所下降。当保温时间为 90 min 时, 合金的力学性能已完全满足固溶态产品的要求。当保温时间达到 120 min 时, 合金的塑性最好。根据上述实验结果, 在 790 °C 热处理制度下, 合理的固溶保温时间为 90 ~ 120 min。

表 1 固溶处理前后 QBe2 铍青铜合金的力学性能

Table 1 Mechanical performances of QBe2 beryllium bronze alloy before and after solid solution treatment

Solution treat/ min	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Hardness /MPa	Elongation after break/%
0	726.7	630.3	240	4.9
30	621.8	338.1	162.3	21.2
60	532.6	261.8	122.3	37.3
90	500.6	230.2	107.3	40.4
120	514.4	246.8	114.7	41.5

分析认为, 固溶过程中合金元素进入铜基体中会引起点阵畸变。但随着固溶保温时间从 0 延长至 90 min 时, 晶粒长大, 更多的析出相溶解于铜基体中, 合金的晶界强化和析出强化作用明显减弱, 导致合金的强度和硬度下降, 塑性提高。当保温时间为 120 min 时, 合金的塑性最好。

### 3.2 固溶保温时间对合金导电率的影响

图 1 为 QBe2 铍青铜合金的导电率随固溶保温时间的变化曲线。固溶处理前 QBe2 铍青铜合金的电导率为 17.7% IACS; 固溶处理后, 随着固溶保温时间的延长,

QBe2 铍青铜合金的电导率下降。当保温时间为 30 min 时,合金的电导率变化不明显,约为 17.4% IACS;当保温时间为 60 min 时,合金的电导率降低至 16.3% IACS;当保温时间为 90 和 120 min 时,合金的电导率分别下降至 15.7% IACS 和 15.2% IACS。

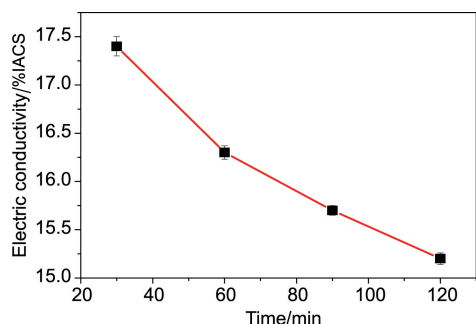


图1 在 790 °C, 不同固溶保温时间下 QBe2 铍青铜合金的电导率  
Fig. 1 Conductivity of QBe2 beryllium bronze alloy under different solution holding time at 790 °C

合金的电导率与内部缺陷和溶质原子的浓度密切相关,因为缺陷和溶质原子会破坏晶格势场的周期性,导致基体晶格发生扭曲畸变从而影响合金的电导率。随着固溶保温时间的延长,合金元素进入铜基体中,而引起点阵畸变,而点阵畸变对电子运动有强烈的散射作用,会阻碍电子运动导致合金电阻率上升,进而使得合金导电率降低<sup>[6-9]</sup>。

### 3.3 固溶保温时间对合金组织的影响

利用 Olympus Gx51 金相显微镜观察在 790 °C 下固溶保温不同时间的试样组织(图 2),并统计其平均晶粒尺寸,如表 2 所示。当固溶保温时间为 30 min 时,合金出现再结晶,并形成细小的等轴晶组织,平均晶粒尺寸小于 10 μm,

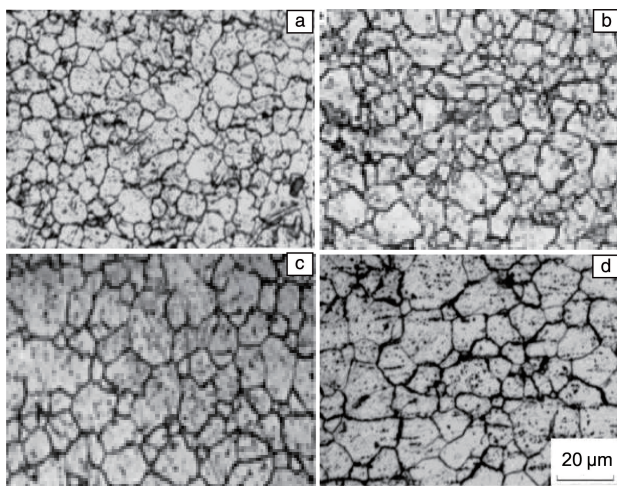


图2 QBe2 铍青铜合金在 790 °C 不同固溶时间后的金相组织: (a) 30 min, (b) 60 min, (c) 90 min, (d) 120 min

Fig. 2 Metallographic structure after solution at 790 °C for 30 min (a), 60 min (b), 90 min (c) and 120 min (d)

表2 在 790 °C、不同固溶保温时间下 QBe2 铍青铜合金的平均晶粒尺寸

Table 2 Average grain size and yield strength with different solution holding time at 790 °C

Holding time/min	30	60	90	120
Average grain size/μm	9.1	11.4	15.4	19.1

且部分析出相已溶解于铜基体中,如图 2a 所示。随着固溶保温时间的延长,合金中晶粒长大,且晶内析出相颗粒数量减少(图 2b)。当固溶保温时间为 90 min 时,合金中平均晶粒尺寸约为 15 μm,且试样内部析出相基本完全溶解于铜基体中,如图 2c 所示。继续延长保温时间至 120 min,合金中的晶粒长大不明显(图 2d)。

### 3.4 固溶保温时间的优化

固溶处理对 QBe2 铍青铜合金组织的影响与合金基体再结晶、晶粒长大和析出相溶解行为密切相关。固溶处理前, QBe2 铍青铜合金经过冷轧变形,固溶处理温度为 790 °C,明显高于其再结晶温度。在较高的温度条件下,合金发生回复所消耗的形变储能较小,为后续再结晶提供了更大的形变储能,再结晶形核率明显增大,因此合金在较短的保温时间内(如 30 min)就基本发生了再结晶,形成了细小的等轴晶。继续延长固溶保温时间,合金在较高的温度条件下晶界迁移率较大,且析出相逐渐溶解于铜基体中,析出相对晶界迁移的阻碍作用较小,合金的晶粒明显长大。晶界迁移的驱动力是界面自由能,在后续的晶粒正常长大过程中,随着固溶保温时间的延长,晶界迁移的驱动力下降,达到近平衡状态,晶界迁移率下降,固溶保温时间大于 90 min 时,合金的晶粒长大已不明显了。

因位错受晶界阻挡形成塞积群,当塞积群中领头位错受到的应力达到某一数值,即可将相邻晶粒中的位错源开动时,即构成屈服条件,与此应力对应的外力即屈服强度。邹章雄、Yan 等的研究发现,多晶材料的外加切应力与晶粒直径平方根的倒数呈线性关系,即 Hall-Petch 关系<sup>[10-13]</sup>。

对在 790 °C、不同保温时间固溶后的 QBe2 铍青铜合金试样的屈服强度和晶粒尺寸进行拟合分析如图 3 所示,结果表明,60, 90 和 120 min 实验结果符合基于长时间固溶的单相固溶体的 Hall-Petch 关系,而 30 min 的实验数据却远高于 Hall-Petch 关系预测值,说明 30 min 时第二相强化作用依然存在,此时 γ 相未完全固溶于基体晶格点阵;固溶时间为 60 min 时,可以认为 γ 相关强化相已基本溶入基体晶格点阵,第二相强化作用消失,但实验材料的屈服强度低于 Hall-Petch 关系的预测值,表明第二相虽已基本溶解,失去第二相强化作用,但并未形成充分均匀的固溶体,处于固溶强化效果欠佳的状态。



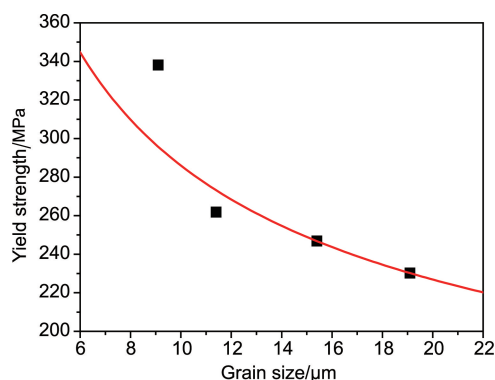


图 3 QBe2 在 790 ℃、不同固溶时间条件下屈服强度与晶粒尺寸关系

Fig. 3 Relation between yield strength and average grain size of QBe2 alloy solutioned at 790 ℃ from experimental results and theoretical curve of Hall-Petch formula

## 4 结 论

本文对 QBe2 铍青铜合金进行了 790 ℃、固溶保温时间分别为 30, 60, 90 和 120 min 的固溶处理, 并对合金的抗拉强度、屈服强度、硬度、断后伸长率和导电率数据进行采集及分析, 发现如下结论。

(1) 随着固溶保温时间延长至 90 min, QBe2 铍青铜合金的抗拉强度、屈服强度及硬度不断降低, 而断后伸长率不断增大。当固溶保温时间为 120 min 时, 合金的塑性最好。

(2) QBe2 铍青铜合金的导电率随固溶保温时间的延长而逐渐下降。当保温时间延长至 90 和 120 min 时, 导电率下降显著。

(3) 在固溶保温时间为 30 min 时, 合金基本发生了完全再结晶, 并形成平均晶粒尺寸约为 10 μm 的等轴晶组织, 且部分析出相已溶解于铜基体中。随着固溶保温时间的延长, 合金中的晶粒长大, 且晶内析出相颗粒数量减小。当固溶保温时间延长至 120 min 时, 合金中的晶粒长大不明显。

(4) 由实验可以得出, QBe2 铍青铜合金在 790 ℃热处理制度下的最佳固溶保温时间为 90~120 min; 且不同固溶保温时间处理后, 材料的屈服强度与平均晶粒尺寸符合 Hall-Petch 关系。

## 参考文献 References

- [1] 范瑛, 谭云, 陶萍, 等. 材料导报[J], 2014, 28(5): 100-103.  
FAN Y, TAN Y, TAO P, *et al.* Material Review[J], 2014, 28(5): 100-103.
- [2] 叶丽梅. 世界有色金属[J], 2017(1): 29-30.  
YE L M. World Nonferrous Metal[J], 2017(1): 29-30.
- [3] 皮爱民. 世界有色金属[J], 2019(17): 168-169.  
PI A M. World Nonferrous Metal[J], 2019(17): 168-169.
- [4] 张保华, 张勇, 岳丽娟. 中国金属通报[J], 2019(11): 121-122.  
ZHANG B H, ZHANG Y, YUE L J. China Metal Bulletin[J], 2019(11): 121-122.
- [5] 范俊玲, 郑磊. 金属热处理[J], 2019, 44(9): 173-176.  
FAN J L, ZHENG L. Heat Treatment of Metals[J], 2019, 44(9): 173-176.
- [6] 马冬威, 张春, 张元好, 等. 金属热处理[J], 2020, 45(5): 74-77.  
MA D W, ZHANG C, ZHANG Y H, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2020, 45(5): 74-77.
- [7] 张玉, 李明, 杨文龙, 等. 材料热处理学报[J], 2020, 41(4): 40-46.  
ZHANG Y, LI M, YANG W L, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2020, 41(4): 40-46.
- [8] 冯义成, 张佳鹏, 陈宏涛, 等. 材料热处理学报[J], 2020, 41(5): 42-50.  
FENG Y C, ZHANG J P, CHEN H T, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2020, 41(5): 42-50.
- [9] 喻文新, 王勇, 杨贤军, 等. 金属热处理[J], 2020, 45(5): 62-68.  
YU W X, WANG Y, YANG X J, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2020, 45(5): 62-68.
- [10] 邹章雄, 项金钟, 许思勇. 物理测试[J], 2012, 30(6): 13-17.  
ZOU Z X, XIANG J Z, XU S Y. Physics Examination and Testing[J], 2012, 30(6): 13-17.
- [11] YAN C, GUAN Y D, SI G, *et al.* Scripta Materialia[J], 2019, 172: 77-82.
- [12] TIANLIN H, LINFEI S, ANEELA W, *et al.* Acta Materialia[J], 2018, 156: 369-378.
- [13] YANG J, QIAO J W, MA S G, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2019, 795: 269-274.

(编辑 吴 锐)